

Bioenergiakeskuksen julkaisusarja
(BDC-Publications)



LATVAHUKKAPUUN HYÖDYNTÄMINEN ENERGIAPUUKSI KONEELLISEEN PUUNKORJUUSEEN INTEGROITUNA MÄNNIKÖN ENSIHARVENNUKSELLA

Tero Vesisenaho

Marjo Niemi, Heidi Wickstrand, Markku Vääräsmäki

Hankeraportti

Lokakuu 2002



**JYVÄSKYLÄN
AMMATTIKORKEAKOULU**

Luonnonvarainstituutti

SISÄLTÖ

1 TUTKIMUKSEN TAUSTA.....	3
2 TUTKIMUKSEN TAVOITE.....	4
3 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS	5
3.1 Tutkimustyömaa.....	5
3.2 Puutavaran mittaus	8
3.3 Hakkuun aikatutkimus.....	10
3.4 Metsäkuljetuksen aikatutkimus	12
4 TULOKSET	13
4.1 Puutavara.....	13
4.1.1 Energiapuun määrä	13
4.1.2 Energiapuun kertymä	14
4.2 Hakkuu.....	16
4.3 Metsäkuljetus.....	19
4.4 Energiapuun hankinta.....	22
4.4.1 Energiapuun hankintamäärä ja työllisyys	22
4.4.2 Energiapuun tuotantokustannukset.....	23
5 TULOSTEN TARKASTELU	26
LÄHTEET	28



1 TUTKIMUKSEN TAUSTA

Energiapuun korjuuseen ensiharvennuksilta ja nuoren metsän hoitokohteilta ei ole kehitystoimista huolimatta onnistuttu löytämään yhtä ja oikeaa työtapaa, jolla energiapuun kustannustaso olisi kilpailukykyinen vaihtoehtoisten polttoaineiden kanssa myös suuremmassa kokoluokassa. Tarvittavan korjuukaluston investointi on usein myös niin korkea, että paikalliset energiapuun hankintamäärät eivät riitä kattamaan investoinnista aiheutuvia kustannuksia. Tämän takia houkutteleva vaihtoehto energiapuun korjuuseen on energiapuun ja ainespuun hankinnan integrointi tehtäväksi samalla konekalustolla ja samoilla työmailla.

Puumarkkinoilla mäntykuitupuun menekki on vaihdellut säännöllisesti. Etenkin metsänhoitoyhdistyksen hankintapalvelun toiminnalle suuren kuiduttavan teollisuuden armoilla eläminen on ollut ongelmallista. Sen takia uusien markkinointikanavien löytäminen mäntykuitupuulle auttaisi myös muuta puunhankintaa. Mäntykuitupuun ja alle ainespuukokoisen hukkalatvan korjuu yhdessä energiapuiksi mahdollistaisi etenkin männiköiden ensiharvennusten toteuttamisen myös niinä aikoina, kun mäntykuitupuulle ei ole kysyntää metsäteollisuudessa.

Latvahukkapuun korjuu mahdollistaisi myös paikallisten resurssien laajemman käytön energiapuun hankinnassa, mikä tarjoaisi lisätyötä paikka-/seutukunnalle. Energiapuun käyttökohteina mahdollisia toimituspaikkoja ovat Saarijärven Kaukolämpö Oy sekä uudet hakelämmityskohteet. Kun energiapuun toimittamiseen on olemassa valmis toimintamalli ja tunnettu kustannusrakenne, on investointipäätös useassa tapauksessa nykyistä huomattavasti helpompi tehdä.

2 TUTKIMUKSEN TAVOITE

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää:

1. Saarijärven metsänhoitoyhdistyksen alueelta energiapuuksi hankittavissa olevan, toistaiseksi hyödyntämättömän latvahukkapuun määrä ja hankintakustannukset koneellisesti korjattavilta männiköiden ensiharvennuskohteilta kolmella eri hakkuutavalla.
2. Voidaanko metsänhoitoyhdistyksen hankintapalvelun harvennuskohteilta parun talteenoton jälkeen kertyville pienelle kuitupuumäärälle löytää vaihtoehtoisia, kustannuskilpailukykyisiä markkinointikanavia.
3. Antaako hakkuukonemittaus luotettavan mittaustuloksen energiapuulle, joka karsitaan ja katkaistaan 3 cm:n minimilatvaläpimitasta.

3 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS

Tutkimuksen toteutuksesta on vastannut Jyväskylän ammattikorkeakoulun Luonnonvarainstituutti. Tutkimuksen vastuullinen toteuttaja, aineiston keruun ja käsittelyn ohjaaja, lukujen 1, 2, 4.4 ja 5 kirjoittaja sekä lokakuussa tehtyjen valuuttamuunnosten, muutamien korjausten sekä täydennysten tekijä on ollut MML Tero Vesisenaho. Kenttäkokeiden toteutukseen osallistui myös MTI Tapani Sauranen Jyväskylän ammattikorkeakoulun Luonnonvarainstituutista. Aineiston keruusta, käsittelystä ja raportoinnista ovat vastanneet bioenergiaan erikoistuvat kolmannen vuosikurssin agrologi (AMK) -opiskelijat seuraavasti:

1. Puutavaran mittaus: Markku Vääräsmäki ja Antti Laukkanen (vain mittaus)
2. Hakkuun aikatutkimus: Heidi Wickstrand ja Marjo Niemi
3. Metsäkuljetuksen aikatutkimus: Paula Sookari

Työn rahoitti Maaseudun Kehittämisyhdistys Viisari ry/Leader+. Hankkeen vastuullisena johtajana ja ohjausryhmän puheenjohtajana toimi Saarijärven metsänhoitoyhdistyksen toiminnanjohtaja Pekka Mattila. Tutkimustyömaiden hankinnasta sekä suunnittelusta vastasi Pekka Kuusela Saarijärven metsänhoitoyhdistyksestä. Lisäksi ohjausryhmään kuuluivat Esko Kauppinen ja Tero Vesisenaho (sihteeri) Jyväskylän ammattikorkeakoulun Luonnonvarainstituutista, sekä Jorma Rautjoki Maaseudun Kehittämisyhdistys Viisari ry:n edustajana.

3.1 Tutkimustyömaa

Tutkimustyömaa sijaitsi Saarijärven kaupungin Häkkilän kylässä Saarijärven metsänhoitoyhdistyksen maalla (KUVIO 1). Tutkimustyömaana oli iältään 35-vuotias lähes puhdas VT-männikkö, jossa tehtiin normaali ensiharvennus. Puuston keskipituus ennen harvennusta oli 13,5 metriä ja keskiläpimitta 14 cm. Puuston tiheys oli ennen har-

HUOM! Tutkimuksen jälkeen mäntykuitupuun minimiläpimitta on alentunut 7 cm:stä 6 cm:iin.

vennusta keskimäärin 1676 runkoa/ha ja puuston pohjapinta-ala 25,2 m²/ha. Runkojen poistuma hakkuussa oli 475–704 kpl/ha. Hakkuussa ei käsitelty alle ainespuukokoisia energiapuiksi kelpollisia runkoja, joita työmaalla oli arviolta noin 200–300 runkoa/ha. Näin ollen pääosa työmaasta olisi ollut Kestävän metsätalouden rahoitustuen nuoren metsän hoidon tuen piirin kuulumatonta aluetta, vaikka alikasvospuutkin olisi korjattu talteen. Elävää latvusta rungoissa oli keskimäärin vain 5,5 m ja kuivat oksat alkoivat runkojen tyvestä. Työmaan puustotunnukset määritettiin systemaattisesti sijoitetuilta ympyräkoealoilta.



KUVIO 1. Tutkimustyömaan sijainti Saarijärven Häkkilässä (kohde 1).

HUOM! Tutkimuksen jälkeen mäntykuitupuun minimiläpimitta on alentunut 7 cm:stä 6 cm:iin.

Tutkimustyömaalla verrattiin seuraavia neljää hakkuumenetelmää:

1. Normaali tavaralajihakkuu, jossa hakataan mäntyrungoista tukkia, pikkutukkia, parrua (minimi latvaläpimitta 9 cm) ja kuitupuuta (minimi latvaläpimitta 7 cm) = **TVL**
→ vertailutaso kustannuksille ja työn tuottavuudelle
2. Tukki + pikkutukki + parru + karsittu latva 3 cm:iin saakka = **Latva3**
→ karsittua energiapuuta kuitu- ja latvaosasta
3. Tukki + pikkutukki + parru + karsittu latva = **Latva0**
→ karsittua energiapuuta kuitu- ja latvaosasta
4. Parru + karsimaton latva = **Osapuu**
→ osin karsittua energiapuuta kuitu- ja latvaosasta

Hakkuussa tavoitteena oli katkoa kunkin tavaralajin pölkyt puutavaralajeittaisiin kouraisutaakkoihin ja metsäkuljetuksen kannalta tarkoituksenmukaiseen runsaan viiden metrin pituuteen. Raportin myöhemmissä kohdissa menetelmää yksi eli normaalia tavaralajihakkuuta kutsutaan TVL:ksi, menetelmää kaksi kutsutaan latva3:ksi, menetelmää kolme latva0:ksi ja menetelmää neljä osapuu-menetelmäksi. Kuviossa 2 esitetään eri energiapuulajien latvaosat kouraisutaakoissa maastossa.



KUVIO 2. Energiapuulajit vasemmalta oikealle: latva3, latva0 ja osapuu.

HUOM! Tutkimuksen jälkeen mäntykuitupuun minimiläpimitta on alentunut 7 cm:stä 6 cm:iin.

3.2 Puutavaran mitta

Energiapuun mittauksessa tavoitteena oli saada selville tuotetun energiapuun määrä hakkuumenetelmittäin. Pölkyistä mitattiin läpimitta puolivälistä sekä pituus. Näiden tietojen avulla saatiin laskettua pöllyn tilavuus. Läpimitan määrittämisessä käytimme mittasaksia ja pituuden mittaamisessa mittavälineenä oli normaali metsurimitta. Jo-kaista menetelmää kohti oli seitsemän koealaa ja mittasimme kaikki energiapuupölkyt jokaiselta koealalta. Osapuun karsimattomien latvaosien mittaustulokseen lisättiin oksamassan otantamittauksella (karsinta + punnitus) määritetty keskimääräinen 15 % oksabiomassan määrä. Ensimmäisenä työpäivänä hakkuukoneen värimerkkausjärjestelmä oikkuili, mikä hidasti työtämme hieman, koska kuitupuujäreysisen energiapuun ja parrujen erottelu oli vaikeahkoa.

Käsinmittauksen tuloksia verrattiin hakkuukoneen mittaustuloksiin latvasta katkaistujen energiapuutavaralajien, kuituosa + latva3, osalta. Mittaustuloksia vertailtaessa päädyimme siihen, että hakkuukonemittaa käytetään 'virallisena mittana' kuitupuujäreysisten energiapuukappaleiden osalta. Karsituksessa latvassa (latva0) ja karsimattomassa latvassa (osapuu) käsinmittaus oli ainoa mittaustieto ja siten perusmittausmenetelmä. Latva3:ssa käytimme mittaustapana yksinomaan hakkuukonemittaa. Taulukossa 1 esitetään mittausten tulokset eli menetelmittäin hakatut energiapuumäärät.

TAULUKKO 1. Tutkimuksen aikana hakatun energiapuun määrä (* = sisältää sekä latvat että kuituosat) ja pölkyjen keskimääräinen koko.

	Keski- läpimitta (puoliväli), cm	Pöllyn pituus, m	Pöllyn tilavuus, dm ³	Hakkuu- kone- mitta, dm ³	Latvat (käsin mittaus), dm ³	Oksa- biomassa, dm ³	Yhteensä, dm ³
Latva3	8,4	4,3	26	6702*	-	-	6702
Latva0	8,4	4,9	27	5565	1384	-	6949
Osapuu	8,0	4,9	25	4090	1414	212	5716

HUOM! Tutkimuksen jälkeen mäntykuitupuun minimiläpimitta on alentunut 7 cm:stä 6 cm:iin.

Hakkuukoneen ja käsinmittauksen tulokset poikkesivat jonkin verran toisistaan niillä rungonosilla, joista oli käytettävissä sekä käsin- että hakkuukonemittauksen tulokset. Kaikissa menetelmissä luotimme hakkuukonemittauksen tarkkuuteen rungon tyvi- eli kuituosan mittauksessa, koska tämän mittauksen tarkkuutta ei ollut syytä epäillä. Sekä latva0:ssa että osapuussa käsinmittauksen tulos näiden tyviosien osalta oli hakkuukoneen mittaa jonkin verran suurempi. Käsimittauksella tilavuudeksi saatiin kahden eri menetelmän koealoilla n. 11 % enemmän (Taulukko 2; 100/88 ja 100/89) kuin hakkuukonemittauksella eli käsinmittausmenetelmä antoi tutkimuskohteella systemaattisesti yliarvion pölkkyjen tilavuudelle. Tämän takia latva0:ssa ja osapuussa korjauskerroimeksi muodostui 10 %:n vähennys kummankin menetelmän latvaosasta ja tyviosien mittatietona käytettiin hakkuukoneen mittaustulosta.

Latva3:n osalta hakkuukonemitta oli ainoa lopullisessa laskennassa käytetty mittausmenetelmä. Tässä menetelmässäkin käytimme lopputuloksen osalta kuitenkin korjauskerrointa muista menetelmistä saatujen tietojen pohjalta. Latva3:ssa hakkuukoneen mittatulos oli käsin mitattua tulosta suurempi, suhdeluku oli 108/100 eli hakkuukone antoi selvän yliarvion latva3:n tilavuudelle, koska em. vertailussa oli todettu käsinmittauksen antavan yliarvion pölkkyjen tilavuudelle. Hakkuukonemittauksen latva3:n tilavuudelle antama yliarvio johtunee siitä, että läpimitan mittausturrit eivät puristu runkoon kiinni ohuita kappaleita karsittaessa, minkä takia läpimitan arvo on liian suuri. Suhdelukujen pohjalta teimme mittaustuloksiin korjauskertoimet mittaustuloksien yhdenmukaistamiseksi eri mittaustapojen välillä. Latva3:ssa käytimme hakkuukoneen antamalle mittaustulokselle korjauskerrointa 90/108.

TAULUKKO 2. Hakkuukone- ja käsinmittauksen erot suhdelukuina esitettynä.

	Hakkuukone	Käsinmittaus	Hakkuukone
Latva3		100	108
Latva0, Osapuu	88 – 89 (tyvet = oikea)	100	

3.3 Hakkuun aikatutkimus

Hakkuussa jokaista hakkuumenetelmää kohden tehtiin seitsemän erillistä koealaa, joiden koot määräytyivät kaadettujen puiden mukaan. Yhdeltä koealalta kaadettiin aina noin kaksikymmentä runkoa, joten koealat eivät määräytyneet pinta-alan vaan kaadetun puuston määrän perusteella. Koealoilta mitattiin sekuntikelloa hyväksikäyttäen työskentelyyn menevä aika, josta eroteltiin siirtoihin kulunut aika ja itse työskentelyaika. Laskennoissa käytetyistä ajoista poistettiin keskeytykset.

Eri koealoilla työskentelyyn kuluneet ajat kirjattiin ylös hakkuumenetelmittäin. Jokaisen koealan jälkeen hakkuukoneelta tulostettiin mittalista, jotta saataisiin selvitettyä, kuinka paljon puukertymä oli aina kutakin koealaa kohden. Lisäksi koealoilta mitattiin hakkuukoneen kulkema matka, jotta pinta-alat saatiin myöhemmin eri koealojen kohdalta laskettua.

Tutkimuksessa käytetty hakkuukone oli saarijärveläisen metsäkoneyrityksen, Kärkänen Veljekset Oy:n vuosimallin 2000 Nokka Profi 6 WD (kuvio 3), ja sitä ajoi koko tutkimuksen ajan Matti Tammelin. Hakkuukoneen kuormaimen ulottuvuus oli 9,8 m, minkä ansiosta hakkuukone pystyi työskentelemään normaalilla 20 metrin ajouravälillä. Kuljettajalla ei ollut aiempaa kokemusta latva3:a lukuun ottamatta muista tutkimuksessa käytetyistä energiapuun hakkuumenetelmistä. Työskentely aloitettiin normaalilla tavaralajimenetelmällä, jota tehtiin aluksi viisi koealaa. Seuraavaksi siirryttiin energiapuumenetelmiin, joita kutakin tehtiin aina viisi koealaa. Tämän jälkeen menetelmät toistettiin vielä kahdella koealalla/menetelmä. Näin aika- ja tuotostuloksiin saatiin useampi eri tarkastelukohde puustoltaan erilaisilta alueilta eri puolilta leimikkoa.



KUVIO 3. Tutkittu Nokka Profi 6 WD -hakkuukone.

Hakkuukoneelta saatujen tietojen ja aikatutkimuksen avulla laskettiin kuinka monta kuutiometriä ainespuuta ja energiapuuta eri koealoilta olisi saatu hakattua tunnin kuluessa. Tämän avulla kyettiin määrittelemään ainespuun hakkuukustannus kuutiometriä kohden. Laskennoissa käytetty hakkuukoneen tuntikustannus oli 366 mk \approx 62 € (Kärhä ym. 2001).

Energiapuun hakkuukustannuksia laskettaessa lähtökohta oli, että hakkuukoneen tulotaso on sama työmenetelmästä riippumatta. Menettelyssä vakioitiin tavaralajihakkuun kustannus, ja hakkuun lisäkustannukset kohdistettiin täysimääräisenä energiapuulle. Energiapuun korjuun ansiosta työmaan puukertymä kasvaa jopa kaksinkertaiseksi. Tästä muodostuvia, jopa merkittäviä hyötyjä puunhankinnan kannalta tutkimuksessa ei ole määritetty.

3.4 Metsäkuljetuksen aikatutkimus

Metsäkuljetuksen aika- ja tuotostutkimuksella selvitettiin energiapuun metsäkuljetuksen tuottavuus ja kustannukset. Aikatutkimus tehtiin menetelmittain kuljettamalla vain puutavaralajipuhtaita kuormia. Kolmelta alalta mitattiin ajomatka ja -aika purkupaikalta koealan reunaan, kuormaamiseen kulunut aika ja kuljettu matka sekä ajo varastopaikalle ja kuorman purkuaika.

Kaikista energiakuormista määritettiin varastopaikalla kuorman vajeus. Kuorman täytöaste laskettiin kuormatilan perän poikkipinta-alan perusteella; montako prosenttia oli vajaan kuormatilan osan pinta-ala koko poikkipinta-alasta. Käsien mitatuista ja lasketuista menetelmittaisistä puumääristä saadun suhdeluvun perusteella laskettiin teoreettinen täyden kuorman koko, jota käytettiin jatkolaskelmissa.

Metsäkuljetuksessa ajokoneena oli Timberjack 1110 (kuvio 4), jonka kuljettajana toimi kaikkien kuormien aikana Tapani Iso-Ahola. Kuormista viimeinen eli osapuu-kuorma ajettiin osin pimeässä, muut kuormat valoisaan aikaan. Pimeässä työskentely oli hieman hitaampaa kuin valoisalla. Metsäkuljetuksessa ylimääräinen tavaralaji, energiapuu, hidasti jossain määrin muiden puutavaralajien metsäkuljetusta. Tätä ajanmenekkiä ei tutkimuksessa ole määritetty.



KUVIO 4. Timberjack 1110 -kuormatraktori kuljettajineen.

HUOM! Tutkimuksen jälkeen mäntykuitupuun minimiläpimitta on alentunut 7 cm:stä 6 cm:iin.

4 TULOKSET

4.1 Puutavara

4.1.1 Energiapuun määrä

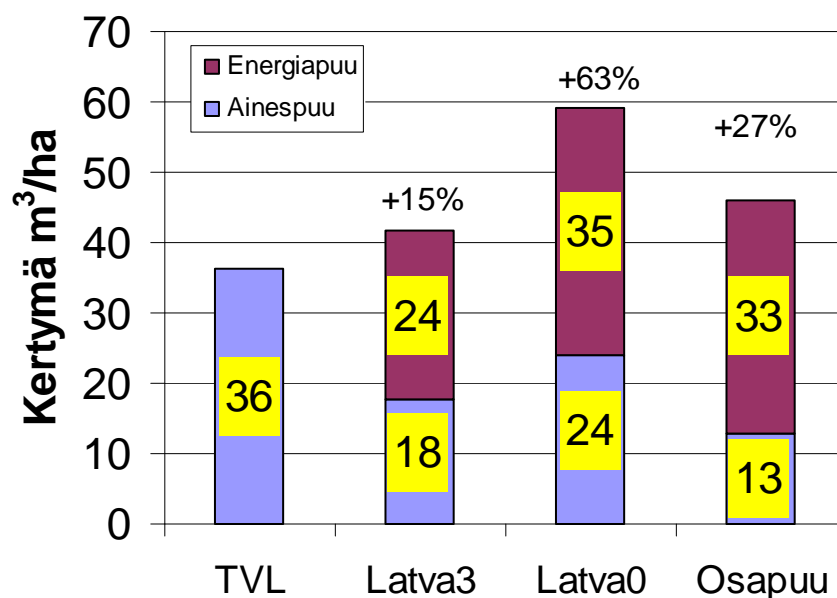
Taulukossa 3 esitetään korjauskertoimilla korjatut energiapuun tilavuudet, joita on käytetty tulosten laskennassa. Sarakkeen 'tyvipölkyt' määrä ilmoittaa hakkuukoneella mitatun energiapuun määrän ja 'latvat' käsin mitatun energiapuun määrän. Samassa taulukossa on verrattu osapuumenetelmän osalta myös oksien talteen saantoa teoreettiseen tuoreiden oksien kokonaismäärään. Osapuumenetelmässä varastolle kuljetettu määrä on vain 9 % teoreettisesta kokonaismäärästä. Teoreettinen elävän oksabiomassan määrä on laskettu Hakkilan (1991) yhtälöllä.

TAULUKKO 3. Laskennassa käytetyt korjauskertoimilla muunnetut energiapuumäärät (dm³).

	Tyvipölkyt	Latvat	Oksat	Teor. oksamassa	Yhteensä dm³
Latva3	5585	-	-	-	5585
Latva0	5565	1246	-	-	6811
Osapuu	4090	1273	212	2250	5575

4.1.2 Energiapuun kertymä

Kuviossa 5 esitetään tutkimustyömaalla toteutuneet energia- ja ainespuukertymät. Energiapuun kertymä oli 24–35 m³/ha. Energiapuun kertymä oli suurin osapuu- ja latva0-menetelmillä ja pienin latva3-menetelmällä. Prosenttiluvut palkkien yläpuolella ilmaisevat kuinka paljon enemmän puutavaraa on korjattu energiapuumenetelmillä tavaralajihakkuuseen verrattuna. Luvut eivät ole täysin vertailukelpoisia, koska koealojen puustot erosivat toisistaan.

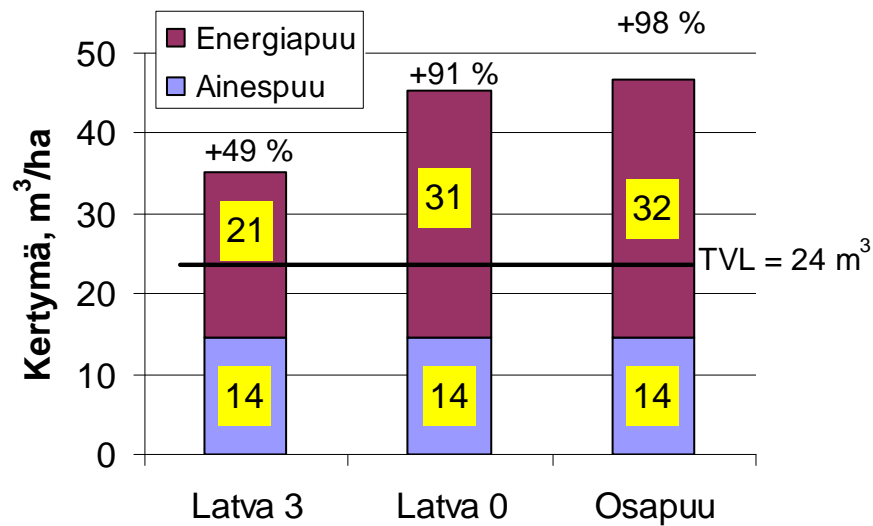


KUVIO 5. Toteutuneet aines- ja energiapuukertymät m³/ha.

Kuvioissa 6–7 esitetään toteutuneiden energia- ja ainespuukertymien mukaiset kertymät rungon ainespuutilavuuden suhteen. Vaakaviiva 'TVL' osoittaa laskennallisen ainespuukertymän TVL-menetelmällä. Koealojen puustojen laadullisten erojen takia tulokset eivät ole kaikin osin yleistettävissä.

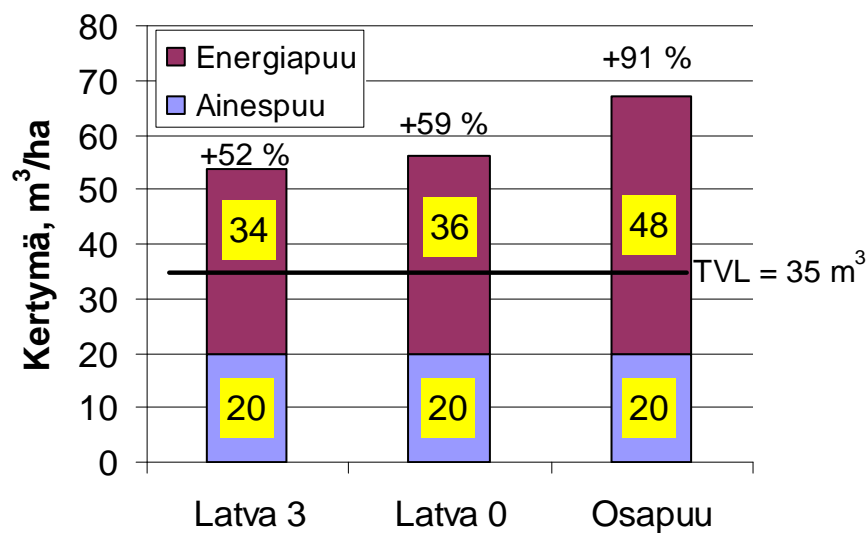
Rungon koon ollessa 50 dm³ (kuvio 6) ainespuukertymä on 24 m³ normaalissa tavaralajihakkuussa. Energiapuumenetelmillä ainespuuta saadaan talteen 14 m³. Aineiston tietojen perusteella puutavaran kertymä 1,5–2 –kertaistuu tavaralajimenetelmään verrattuna rungon koosta riippumatta, kun myös latvaosat otetaan talteen.

HUOM! Tutkimuksen jälkeen mäntykuitupuun minimiläpimitta on alentunut 7 cm:stä 6 cm:iin.



KUVIO 6. Aines- ja energiapuun laskennalliset kertymät rungon koolla 50 dm³.

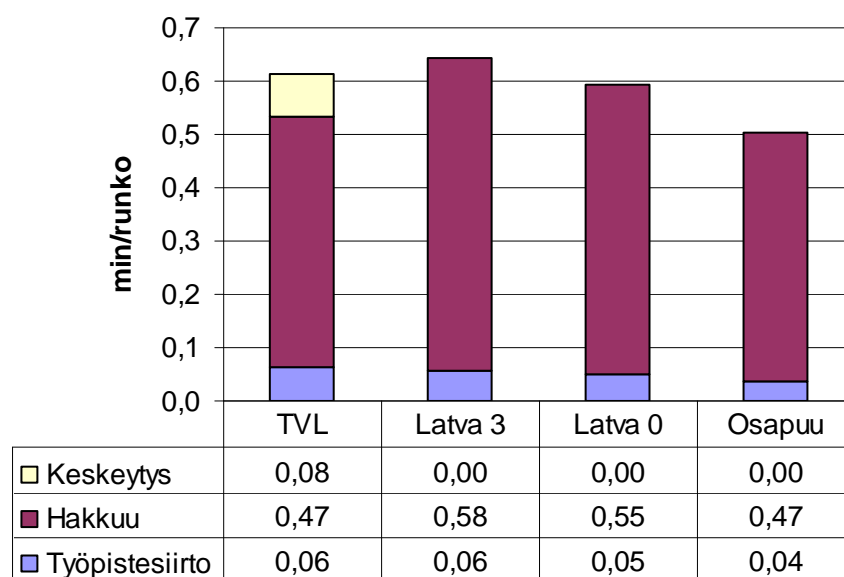
Ainespuurungon koolla 75 dm³ sahauskelpoista puuta (TVL) kertyy 20 m³/ha (kuvio 7), kun poistuman tiheys on sama kuin tutkimusleimikolla. Ainespuumittaista puuta siirtyy energiapuuksi 15 m³. Energiapuukertymät ovat suurempia kuin ainespuukertymä ja lisäkertymän suuruus on 50–100 %.



KUVIO 7. Aines- ja energiapuun laskennalliset kertymät rungon koolla 75 dm³.

4.2 Hakkuu

Hakkuun toteutuneet ajanmenekit esitetään kuviossa 8. Hakkuun aikana keskeytyksiä työhön aiheutui ainoastaan TVL-menetelmässä. Myöhemmässä analyysissä näitä keskeytysaikoja ei ole käytetty. Koska työpistesiiirtojen ajanmenekin voidaan olettaa riippuvan jossain määrin työmenetelmästä, on kullekin työmenetelmälle käytetty ominaista työpistesiiirtojen ajanmenekkiä. Hakkuun ajanmenekki oli kaikkein pienin TVL- ja osapuumenetelmissä, ja hitainta hakkuu oli latva3-menetelmällä.



KUVIO 8. Hakkuun toteutunut ajanmenekki runkoa kohti.

Aika- ja tuotostutkimuksen aineiston perusteella laskettiin hakkuun tehotuntituottavuus eri koaloilla ja työmenetelmillä. Tulokset on esitetty taulukossa 4. Normaaliin tavaralajimenetelmään verraten kaikkein heikoimmalle ainespuun tuottavuudessa jäi menetelmä, jossa energiapuuksi menevää latvaa ei karsittu lainkaan. Eniten ainespuuta energiapuumenetelmistä tuotti hakkuu, jossa latva karsittiin kokonaan.

TAULUKKO 4. Ainespuun hakkuun tehotuntituottavuus (m³/h) koealoilta hakkuumenetelmittain.

Koeala	TVL	Latva3	Latva0	Osapuu
1	9,51	6,97	8,00	7,19
2	9,99	7,34	7,76	5,71
3	10,72	6,32	8,14	5,88
4	6,56	7,61	9,76	5,51
5	11,99	7,30	9,32	8,67
6	5,32	5,41	5,99	5,41
7	6,42	5,96	6,01	3,59
Keskiarvo	8,64	6,70	7,86	5,99

Lisäksi aineistosta laskettiin, energiapuuhaakuun tuottavuus eri hakkuumenetelmillä koealoittain (taulukko 5). Energiapuuhaakuun tuottavuus oli korkein koealoilla, joilla hakkuumenetelmänä oli latva0 ja vastaavasti tuottavuus oli pienin latva3-menetelmässä.

TAULUKKO 5. Energiapuuhaakuun tehotuntituottavuus (m³/h) koealoilta hakkuumenetelmittain.

Koeala	Latva3	Latva0	Osapuu
1	4,24	4,44	5,11
2	3,63	5,29	7,78
3	2,32	5,48	5,21
4	5,27	6,09	5,45
5	5,06	7,35	4,63
6	2,63	4,18	6,19
7	3,49	4,04	5,68
Keskiarvo	3,81	5,27	5,72

Energiapuun hakkuukustannuksia laskettaessa pääperiaatteena oli, että hakkuukoneen tulotaso on vakio työmenetelmästä riippumatta. Laskennassa hakkuukoneen tuntikustannuksena käytettiin $366 \text{ mk/h} \approx 62 \text{ €/h}$ (Kärhä ym. 2001). Pienin energiapuun hakkuukustannus oli menetelmällä, jossa latva karsittiin kokonaan (taulukko 6). Tällöin keskimääräinen hakkuukustannus oli runsaat 7 €/m^3 . Korkein hakkuukustannus oli menetelmällä, jossa hakattiin karsittua latvaa 3 cm:iin saakka.

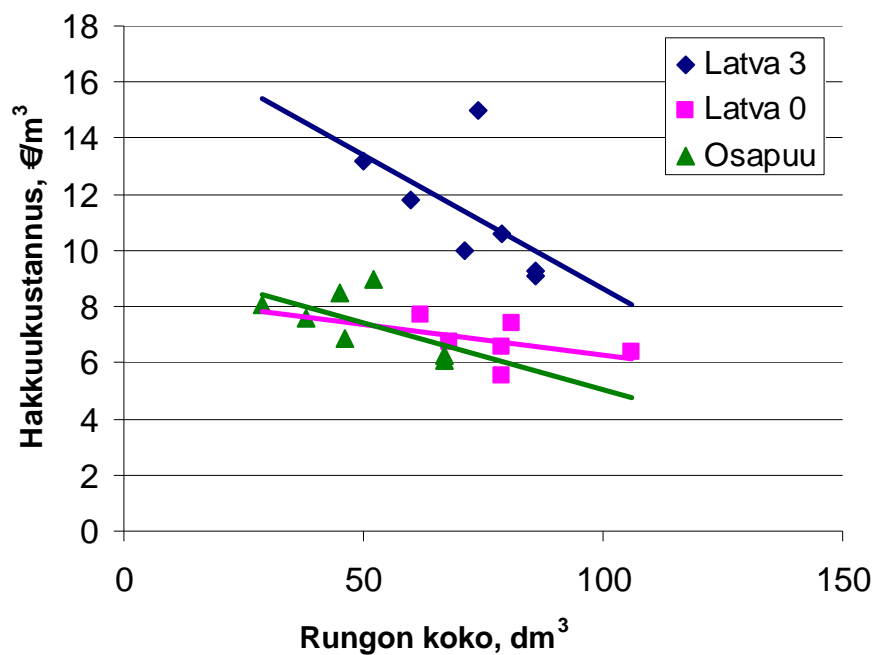
Latva0-menetelmässä koealan kuusi hakkuukustannusta ei ole käytetty enää myöhemmissä laskentavaiheissa, koska koeala poikkesi olennaisesti muista koealoista. Koeala sijaitsi leimikon reunassa ja kuljettaja joutui siirtymään huomattavasti enemmän avatessaan uutta pistoajouraa eikä puiden valintatilanne ollut muita koealoja vastaava.

TAULUKKO 6. Energiapuun hakkuukustannus (€/m^3).

Koeala	Latva3	Latva0	Osapuu
1	9,99	6,71	6,08
2	10,6	7,41	6,88
3	15,0	6,59	8,50
4	9,12	6,38	9,00
5	9,28	5,56	6,26
6	13,2	10,7	7,60
7	11,8	7,71	8,07
Keskiarvo	11,3	7,29	7,48

Kuviossa 9 esitetään, kuinka rungon koko vaikuttaa energiapuun hakkuukustannukseen. Yksittäiset pisteet kuvaavat menetelmittäisiä koealakohtaisia hakkuukustannuksia ja suorat lineaarisesti sovitettuja menetelmittäisiä kustannustasoja. Voimakkaimmin kustannukset laskevat rungon koon kasvaessa latva3-menetelmällä. Alhaisimmat hakkuukustannukset syntyivät pienillä rungoilla latva0-menetelmällä ja hieman suuremmilla rungoilla osapuumenetelmällä. Työskenneltäessä ensiharvennusmänniköissä varteen otettavia hakkuumenetelmiä tutkimuksen perusteella olivat siis alhaisimpiin hakkuukustannuksiin jääneet hakkuumenetelmät.

HUOM! Tutkimuksen jälkeen mäntykuitupuun minimiläpimitta on alentunut 7 cm:stä 6 cm:iin.



KUVIO 9. Energiapuun hakkuukustannus hakkuumenetelmittäin eri rungon koolla.

4.3 Metsäkuljetus

Metsäkuljetuksessa kuormien koot olivat taulukon 7 mukaiset. Suurimmat kuorman koot saavutettiin karsituilla tavaralajeille eli latva0:lla ja latva3:lla. Latva0:n kuorman koko oli latva3:a suurempi pidempien pölkkyjen ansiosta. Osapuukuormien kokoa pienensi kuorman tiiviyyttä heikentänyt oksamassa.

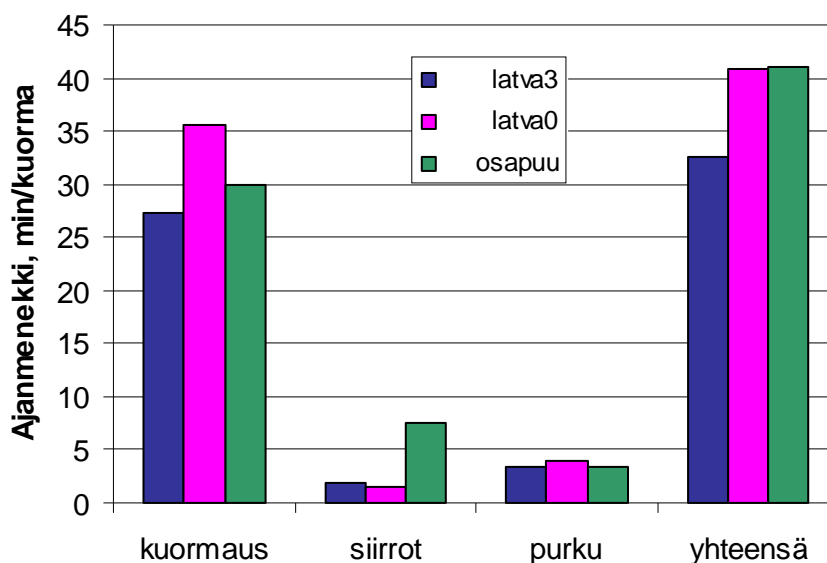
TAULUKKO 7. Energiapuukuormien toteutuneet täyttöasteet ja laskennalliset täysien kuormien koot tavaralajeittain.

	Latva3	Latva0	Osapuu
Täyttöaste	73%	90%	84%
Täysi kuorma	7,65m ³	8,13m ³	6,65m ³

Kuviossa 10 esitetään tutkimustyömaalla toteutuneet kuormittaiset ajanmenekit, joiden perusteella laskettiin metsäkuljetuksen tuottavuus ja kustannukset tavaralajeittain.

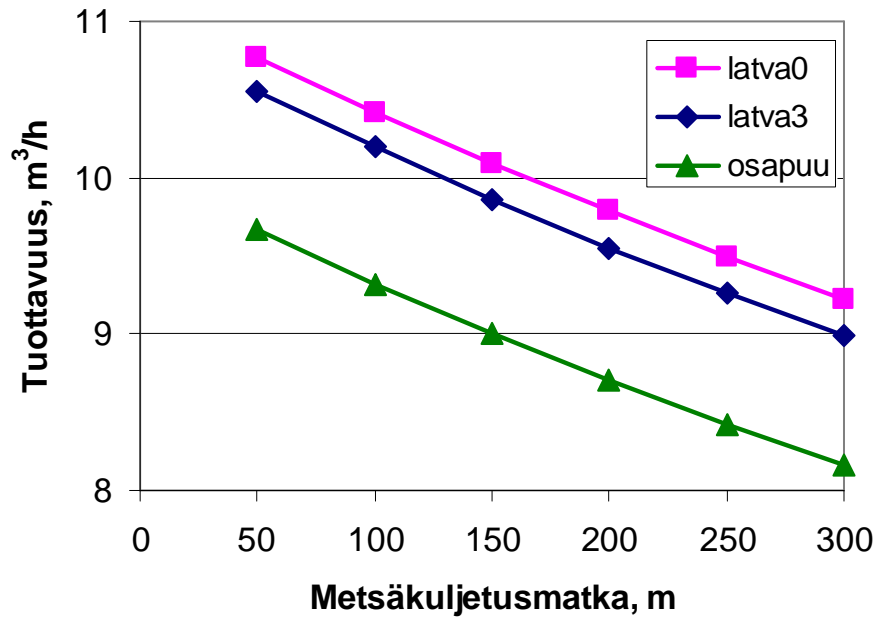
HUOM! Tutkimuksen jälkeen mäntykuitupuun minimiläpimitta on alentunut 7 cm:stä 6 cm:iin.

Erot puutavaran käsittelyn ajanmenekkeissä olivat menetelmien välillä pieniä. Kuormauksen ajanmenekki kuutiometriä kohti laskettaessa oli kuitenkin muita menetelmiä 10 % suurempi osapuumenetelmässä. Tämä johtui siitä, että pitkiä osapuulatvakappaleita oli vaikea kuormata jäävän puuston seasta. Siirtoajoissa eli kuormattuna ja tyhjänä ajossa menetelmien välillä oli sen sijaan suuria eroja palstojen sijainnin eroista johtuen. Tämän takia laskennassa on vakioitu siirtoajat, sillä niihin raaka-aineen ei voida katsoa vaikuttavan. Kuorman purkamisen ajanmenekki oli raaka-aineesta riippumatta lähes vakio.



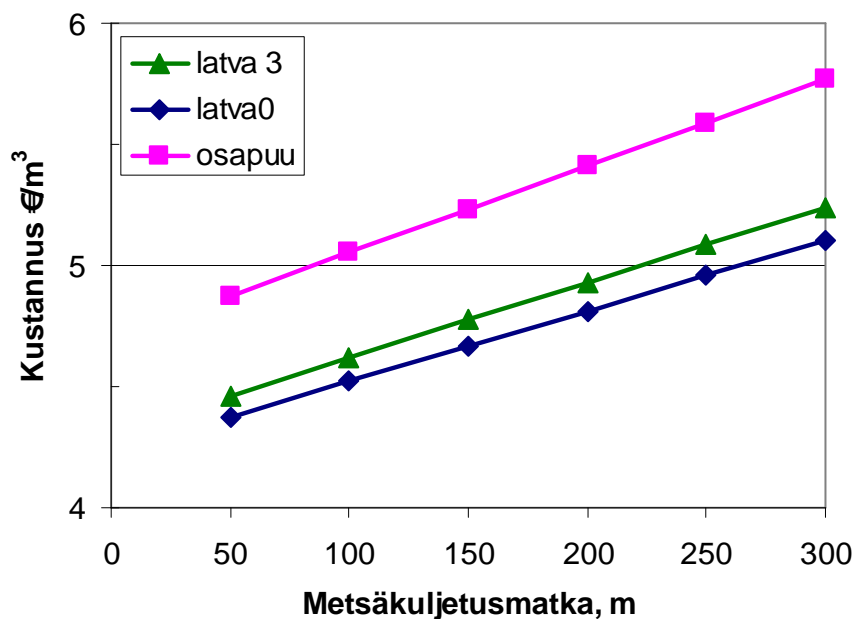
KUVIO 10. Metsäkuljetukseen käytetyt ajat työvaiheittain.

Kunkin energiapuukuorman puumäärä jaettiin kuormaamiseen kuluneella ajalla, josta saatiin yhden kuutiometrin kuormaukseen käytetty aika (min/m^3). Saatu aika kerrottiin täyden kuorman kuutiometrimäärällä, jolloin saatiin laskettua kokonaisen kuorman kuormaamisen ajanmenekki. Saatuun kuormausaikaan lisättiin tutkimuksessa määritetty keskimääräinen ajoaika purkupaikalta koealalle ja koealalta purkupaikalle eli tyhjänä ja kuormattuna ajo. Aikaan lisättiin vielä kuorman purkamiseen käytetty aika, joka muutettiin täysien kuormien mukaiseksi. Kuviossa 11 esitetään laskennallisten ajanmenekkien perusteella määritetty metsäkuljetuksen tehotuntituottavuus eri metsäkuljetusmatkoilla. Tuottavuus on heikoin osapuumenetelmässä pienimmän kuorman koon takia.



KUVIO 11. Metsäkuljetuksen tehotuntuottavuus eri kuljetusmatkoilla.

Timberjack 1110 -kuormatraktorin verottomana tuntikustannuksena on laskennassa käytetty 280 mk/h ≈ 47 €/h. Kun tuntikustannus jaettiin tuottavuudella (m³/h), saatiin määritettyä eri kuljetusmatkoilla aiheutuvat laskennalliset metsäkuljetuskustannukset (kuvio 12). Kalleinta metsäkuljetus on osapuumenetelmässä. Kun metsäkuljetusmatka lisääntyy 100 metrillä, nousee metsäkuljetuskustannus n. 0,3 €/m³.



KUVIO 12. Metsäkuljetuksen laskennallinen kustannus.

HUOM! Tutkimuksen jälkeen mäntykuitupuun minimiläpimitta on alentunut 7 cm:stä 6 cm:iin.

4.4 Energiapuun hankinta

4.4.1 Energiapuun hankintamäärä ja työllisyys

Energiapuuhanhinnan työllisyysvaikutusta ja kertymää tarkasteltiin lupaavimmaksi osoittautuneella menetelmällä eli latva0:lla. Laskelmassa oletettiin keskimääräiseksi rungon ainespuuosan kooksi ensiharvennusmännikössä 75 dm^3 . Keskimääräisenä metsäkuljetusmatkana laskelmassa käytettiin 200 m ja tiekuljetusmatkana hakkeelle 20 km.

Saarijärven metsänhoitoyhdistyksen vuosittain toteuttamien männiköiden ensiharvennusten pinta-ala on 300 ha. Tätä pinta-alaa on käytetty laskelmassa perustasona. Alueen tavoitemäärä männiköiden ensiharvennuksille on 500 ha, joka on laskelman ylärajana. Energiapuumäärän laskennassa on käytetty tässä tutkimuksessa määritettyä hehtaarikohtaista 36 m^3 :n energiapuukertymää. Tällä kertymällä 300 ha:n ensiharvennusalalta olisi korjattavissa 10.800 m^3 energiapuuta, mikä vastaa energiasisällöltään lähes 20.000 MWh (taulukko 8).

Energiapuuhanhinnan työllisyysvaikutus on laskettu hakkuun ja metsäkuljetuksen osalta käyttämällä tässä tutkimuksessa määritettyjä ajanmenekkejä. Haketuksen työllisyysvaikutus on määritetty olettamalla traktorikäyttöisen hakkurin tuottavuudeksi $25 \text{ i-m}^3/\text{h}$. Kaukokuljetuksen ajanmenekki on laskettu traktorikalustolle, jossa kuorman koko on 25 i-m^3 ja keskimääräinen ajonopeus on 20 km/h. Näillä oletuksilla 300 ha:n energiapuukorjuualan suora työllisyysvaikutus olisi 2,6 henkilötyövuotta.

Hakkilan ja Fredrikssonin (1996) esittämällä manuaalisen kokopuukorjuun työllisyysvaikutusluvuilla saadaan selkeästi suuremmat työllisyysvaikutusarviot. Suurin ero työllisyysvaikutuksessa on hakkuuvaiheessa. Suora työllisyysvaikutus näillä arvoilla olisi 7,4 henkilötyövuotta ja välillinen työllisyysvaikutus Toropaisen (1984) esittämällä suhteella 9,6 henkilötyövuotta.

TAULUKKO 8. Energiapuukorjuun kertymä ja työllisyysvaikutus.

Energiapuukorjuun kertymä ja työllisyysvaikutus/Latva0- Rungon keskipöytä 75 dm³, metsäkuljetusmatka 200 m, tiekuljetus 20 km

Energiapuun hankinta			MHY2001	TAVOITE		
Pinta-ala, ha	100	200	300	400	500	ha
Energiapuumäärä, m ³	3600	7200	10800	14400	18000	m ³
Energiapuumäärä, i-m ³	9000	18000	27000	36000	45000	i-m ³
Energiapuumäärä, MWh	6480	12960	19440	25920	32400	MWh
Hakkuu, h	52	104	157	209	261	h
Metsäkuljetus, h	368	736	1104	1472	1840	h
Haketus, h	360	720	1080	1440	1800	h
- Tuottavuus 25 i-m ³ /h						
Kaukokuljetus, h	756	1512	2268	3024	3780	h
- 25 m ³ :n kuorma, 25 km/h						
YHTEENSÄ	1536	3073	4609	6145	7681	h
Suora työllisyysvaikutus, htv	0,9	1,7	2,6	3,4	4,3	htv
Kokopuuhakehankinnan suora työllisyysvaikutus (Hakkila & Fredriksson 1996)						
Hakkuu miestyönä	2304	4608	6912	9216	11520	h
Metsäkuljetus	576	1152	1728	2304	2880	h
Haketus	576	1152	1728	2304	2880	h
Kaukokuljetus, 20 km	979	1958	2938	3917	4896	h
YHTEENSÄ	4435	8870	13306	17741	22176	
	2,5	4,9	7,4	9,8	12,3	htv
Välilliset työpaikat (Toropainen 1984)	3,2	6,4	9,6	12,8	16,0	htv

4.4.2 Energiapuun tuotantokustannukset

Energiapuun tuotantokustannukset määritettiin hakkuun ja metsäkuljetuksen osalta tämän tutkimuksen mukaisilla arvoilla. Kantohinnan osuus tuotantokustannuksesta määritettiin laskemalla energiapuuksi siirtyneen kuitupuun määrä ja asettamalla sen arvoksi 70 mk/m³ ≈ 11,8 €/m³. Haketuksen ja kaukokuljetuksen osalta laskelmassa käytettiin markkinahintatasoa. Energiapuun energiasisältönä laskelmassa on käytetty 1,8 MWh/m³.

Kestävän metsätalouden rahoitustuen vuoden 2002 mukaisen nuoren kasvatusmetsän harvennus- (210,5 €/ha; tukivähyhyke 1; työn tekee palkattu työvoima), energiapuun korjuu- (7 €/m³; kompensoi täysimääräisesti energiapuuksi siirtyvän kuitupuun kanto hintaa) ja haketustuen (1,7 €/i-m³) erittäin suuri vaikutus on laskelmassa otettu huomioon rungon koon ollessa 50 ja 75 dm³ (taulukko 9). Jotta harvennuskohteelle saa harvennustuen, pitää kohteelta yleensä raivata myös alle ainespuukokoisia runkoja. Tämän miestyönä tehtävän toimenpiteen kustannukseksi on laskelmassa oletettu 100 €/ha, ja raivattavaa puustoa ei korjata talteen.

HUOM! Tutkimuksen jälkeen mäntykuitupuun minimiläpimitta on alentunut 7 cm:stä 6 cm:iin.

TAULUKKO 9. Puupolttoainetuotannon kustannukset (€/m³) eri menetelmillä.**- Rungon koko 50 dm³, metsäkuljetusmatka 200 m, kaukokuljetus 20 km**

	Latva 3	Latva 0	Osapuu	
Kantohinta	5,2	3,5	3,4	
Raivaus	4,8	3,3	3,1	
Hakkuu	13	7,4	7,5	
Metsäkuljetus	4,9	4,8	5,4	
Tienvarsihinta	28	19	19	
Haketus	6,7	6,7	6,7	
Kaukokuljetus	4,2	4,2	4,2	
Käyttöpaikkahinta	39	30	30	€/m ³
Tuet yhteensä	-21	-18	-18	€/m ³
Ilman tukia	22	17	17	€/MWh
Tuettu hinta	10,0	6,6	7,0	€/MWh

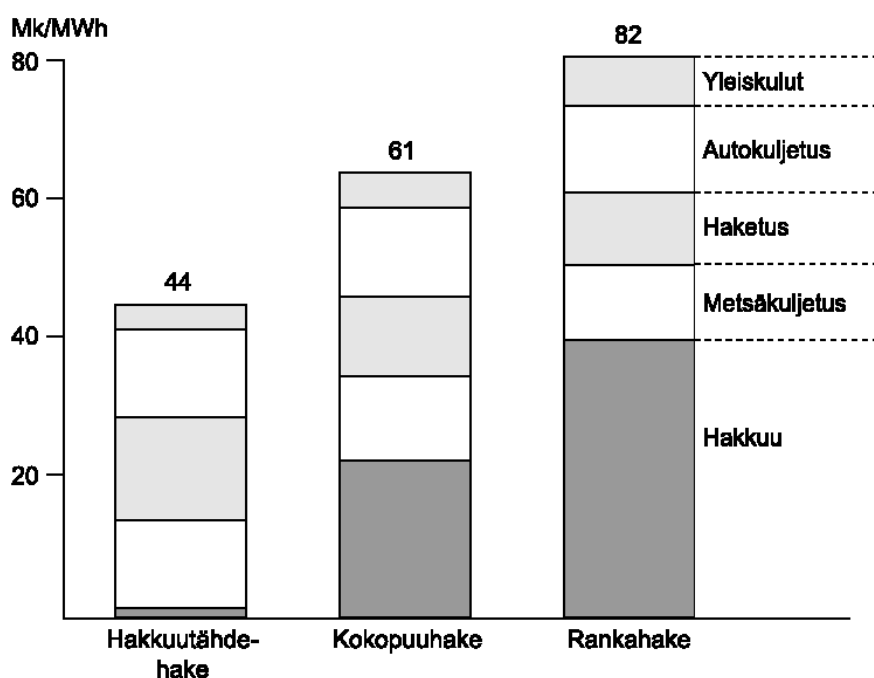
- Rungon koko 75 dm³, metsäkuljetusmatka 200 m, kaukokuljetus 20 km

	Latva 3	Latva 0	Osapuu	
Kantohinta	5,4	5,0	3,8	
Raivaus	3,0	2,8	2,1	
Hakkuu	11	6,8	6,2	
Metsäkuljetus	4,9	4,8	5,4	
Tienvarsihinta	24	19	18	
Haketus	6,7	6,7	6,7	
Kaukokuljetus	4,2	4,2	4,2	
Käyttöpaikkahinta	35	30	29	€/m ³
Tuet yhteensä	-17	-17	-16	€/m ³
Ilman tukia	20	17	16	€/MWh
Tuettu hinta	9,9	7,4	7,2	€/MWh

- Rungon koko 100 dm³, metsäkuljetusmatka 200 m, kaukokuljetus 20 km

	Latva 3	Latva 0	Osapuu	
Kantohinta	5,5	6,1	4,1	
Hakkuu	8,6	6,3	5,0	
Metsäkuljetus	4,9	4,8	5,4	
Tienvarsihinta	16	15	13	
Haketus	6,7	6,7	6,7	
Kaukokuljetus	4,2	4,2	4,2	
Käyttöpaikkahinta	27	26	24	€/m ³
	15	14	14	€/MWh

Tässä tutkimuksessa määritetyt tuettomat tuotantokustannukset ovat hieman korkeampia kuin käytännön KEMERA-tuettu markkinahintataso karsitulle rankahakkeelle. Ensiharvennuksiin integroituna latvamenetelmä on kuitenkin suhdanteista ja tuista riippumattomampi kuin perinteiset energiapuun korjuumenetelmät. Tuet huomioon ottaen nyt määritetyt tuotantokustannukset ovat erittäin kilpailukykyisiä etenkin latva0- ja latva-menetelmillä, joilla lopputuote on karsittua energiapuuta. Metsäntutkimuslaitoksen selvityksen mukaan rankahakkeen ja muiden metsähakelaatujen hintataso on kuvion 13 mukainen.



KUVIO 13. Metsähakkeen hintataso tienvarsihaketusmenetelmää käytettäessä (Hakki-la 2001).

5 TULOSTEN TARKASTELU

Tutkitut energiapuun korjuumenetelmät eivät tulosten valossa tuo ratkaisua energiapuun korjuun korkeaan kustannustasoon, vaikka työmenetelmien tuottavuus parantuu ja kustannustaso alentuu työntekijöiden opittua uusien tekniikoiden salat. Kustannuksiltaan latvapuusta tehty hyvälaatuinen polttohake on varsin kallista työmenetelmästä riippumatta, mikäli tuotetulle energiapuulle ei saa KEMERA-tukea. Hankinnan kalleuden ja polttohakkeen hyvän laadun takia tällaisen polttohakkeen käyttökohteita ovat yleensä kohteet, joissa hyvälaatuisesta hakkeesta voidaan ja kannattaa maksaa; eli pienet, alle 1 MW:n käyttökohteet. Tutkitut menetelmät tarjoavat kuitenkin energiapuutuista ja suhdanteista riippumattoman varteen otettavan vaihtoehdon energiapuun hankintaan myös suuremmassa mittakaavassa sekä mahdollisuuden koneyrityksille lisätyöhön ja -kertymään normaalisti puutavarakertymältään heikoilta ensiharvennuskohteilta.

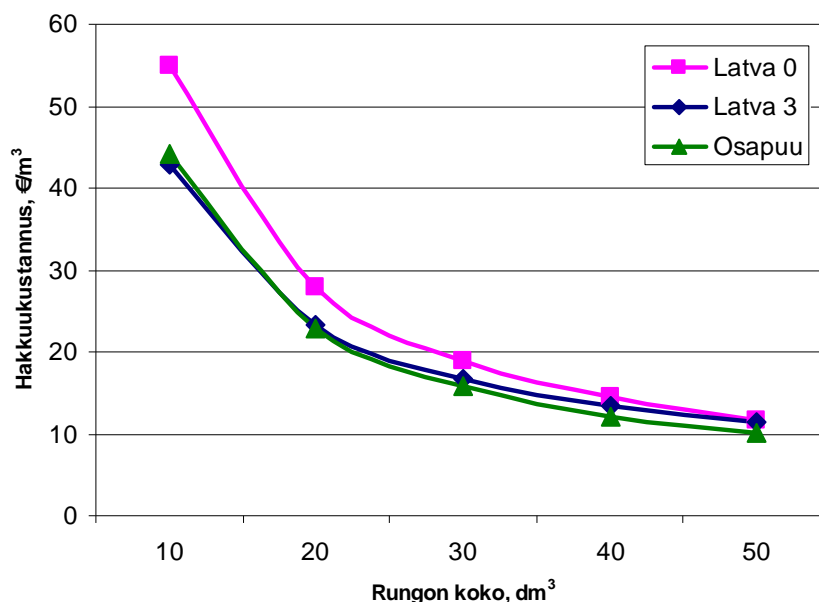
Latva0- ja latva3-energiapuun tuotantokustannukset ovat hyvin kilpailukykyisiä karsitun energiapuun markkinoilla, mikäli kohteet ovat KEMERA-tukikelpoisia. Latva3-puulle hyvä ja maksukykyinen käyttökohde voisi olla myös pilkkeen raaka-aine. Kaikkien tutkittujen menetelmien etuna on myös se, että menetelmillä ei aiheuteta kokopuumenetelmien kaltaisia ravinnetappioita metsämaalle.

Mikäli parru hakattaisiin tästä tutkimuksesta poiketen, aiemmin käytettyyn 8 cm:n läpimitaan saakka, paranisi latvapuun hankinnan kustannusrakenne, kun kuitupuusta pienempi osa siirtyisi energiapuuksi. Kustannusrakenne olisi energiapuun kannalta edullisempi myös silloin, jos parruksi tai tukiksi läpimitaltaan, mutta laadultaan kelpaamatonta puuta olisi vähemmän.

Saarijärven metsänhoitoyhdistyksen toimialueellaan toteuttamilta ensiharvennusmänniköiltä voitaisiin korjata Saarijärven Kaukolämpö Oy:n noin 10.000 MWh:n haketarvetta vastaava määrä hyvälaatuista haketta, mikäli noin puolella ensiharvennuskohteista eli 150 hehtaarilla otettaisiin latvapuuta talteen energiapuuna. Tällöin energiapuun korjuun ja haketoimitusten suora työllisyysvaikutus olisi lähes 1,5 henkilötyövuotta.

HUOM! Tutkimuksen jälkeen mäntykuitupuun minimiläpimitta on alentunut 7 cm:stä 6 cm:iin.

Etenkin alle ainespuukokoisten runkojen käsittely yksiotehakkuukoneella on hyvin kallista. Tutkimusaineiston perusteella laskettu arvio alle ainespuukokoisten runkojen käsittelykustannukseksi on kuvion 14 mukainen. Pienten puiden yksittäiskäsittelyn sijaan käyttökelpoinen ratkaisu olisikin joukkokäsittely.



KUVIO 14. Alle ainespuukokoisten runkojen hakkuukustannus.

Tämän selvityksen perusteella hakkuukonemittaus antaa selvän yliarvion 3 cm:iin saakka karsitusta ja katkaistusta puutavarasta. Hakkuukoneen mittalaite ei pysty määrittämään läpimittaa eikä pituutta luotettavasti ohuelle rungon osalla, koska syöttörullat luistavat osittain ja läpimittaa mittaavat elimet eivät puristu riittävästi runkoa vasten. Tarkan suhdeluvun määrittäminen hakkuukonemittauksen ja todellisen mitan välille vaatisi lisämittauksia. Tällaiset mittaukset voitaisiin toteuttaa hyvin esim. elektronisten mittasaksien Mototarkastus-ohjelmalla.

Tutkimuksessa tehtyjä puutavaran kertymävertailuja ja niiden pohjalta tehtäviä johtopäätöksiä/yleistyksiä vaikeuttaa merkittävästi se, että samanjäreyksisessä puustossakin mekaaniseen puunjalostukseen kelpaavan puutavaran määrä vaihtelee huomattavasti puuston laadun vaihtelujen takia. Siksi luotettavien kertymäsuhdelukujen saaminen aines- ja energiapuumäärien välille edellyttäisi kertymien määrittämistä useilta puustoltaan erilaisilta kohteilta.

LÄHTEET

Hakkila, P. 1991. Hakkuupoistuman latvusmassa. Folia Forestalia 773.

Hakkila, P. 2001. Puuenergian teknologiaohjelman katsaus 1999–2001. Teoksessa: Alakangas, E. (toim.) Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2001.

Hakkila, P. & Fredriksson, T. 1996. Metsämme bioenergian lähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 613.

Kärhä, K., Ryytänen, S. & Rönkkö, E. 2001. Harvennusharvestereiden tuottavuus ja hakkuukustannukset. Työtehoseuran metsätiedote 12/2001.

Toropainen, M. 1984. Aluelämpölaitoksen polttoainevalintojen kannattavuus. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 162.